

## 1kW 소형 풍력발전기의 진동 성능 모니터링

### Vibration Performance Monitoring of a 1kW Small Wind Turbine Generator

김 석 현\* 남 윤 수\*, 유 능 수\*, 박 무 열\*\*, 김 태 형\*\*, 박 해 균\*\*  
Kim, Seock-Hyun Nam, Yoon-Soo Yoo, Neung-Soo Park, Mu-Yeol  
Kim, Tae-Hyoung Park, Hae-Gyun

#### Abstract

A vibration monitoring is performed on a 1kW class stand alone wind turbine(W/T). When a W/T model is developed, general performance under various wind condition should be verified to introduce the product in the market. Especially, vibration characteristics within operating speed range are very important in the aspect of structural stability as well as generator's electrical efficiency. This paper examines the vibration performance of a home made 1kW W/T. Various data of the W/T model are acquired in real time using a remote vibration monitoring system installed in Daekwanryung test site. Vibration stability of the W/T structure is diagnosed based upon the data and the result is used to estimate the applicability of the W/T model.

키워드 : 원격 진동 모니터링 시스템, 1kW 독립형 풍력발전기, 타워 공진  
Keywords : Remote Vibration Monitoring System, 1kW Stand Alone Wind Turbine Generator, Tower Resonance

#### 1. 서론

화석 연료의 제한성과 그 사용에 따른 대기 환경 문제는 연료전지, 태양광, 바이오메스, 조력, 풍력 등 다양한 대체에너지의 개발을 촉진시키고 있다. 최근 강원도에서는 태백준령의 풍부한 풍력자원을 청정 대체 에너지원으로 하여 풍력발전에 대한 투자가 도 차원에서 진행되고 있으며, 강원대학교 풍력발전시스템연구센터는 국내외 풍력발전기의 성능을 실증하는 '대관령 풍력실증 연구 단지'를 조성하여 운영하고 있다. 국제시장에서는 독일을 선두로 미국, 스페인, 덴마크 등이 풍력 발전 산업을 주도

하면서, 1996년 이후 세계 풍력 시장의 최근 연평균 성장률은 무려 40%에 이르고 있다[1]. 선진국에 비하여 국내 풍력 시장은 아직 미미한 수준이나, 대체에너지 보급에 대한 정부, 민간업체 및 연구기관 간의 적극적인 협조로 현재 750kW급의 개발이 완료되어 실증이 진행 중이고, 2MW급 발전기가 개발 중이다[2]. 이와 함께 독립형으로 사용되는 1kW, 6kW, 10kW급 등의 소형 풍력발전기와 풍력-태양광 병합발전에 대한 개발도 이루어지고 있다. 풍력발전기가 개발되어 시장에 보급되려면 발전 성능에 대한 종합적인 실증 작업이 선행되어야 하고, 제작사는 수요자 요구에 따라 실증 결과를 보고할 의무가 있다. 풍력발전기의 실증에 관련하여 구조 진동 문제는 발전기의 구조 안전성뿐만 아니라 발전 성능에 관해서 중요한 현안이 된다[3,4]. 그러나 진동 실증에는 풍향 데이터도 함께 요구되므로 종합적인 모니터링이 가능한 실증단지를 필요로 한다. 최근 국내에서는 대관령 실증단지과 제주 행원

\* 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 교수, 공학박사  
\*\* 강원대학교 기계메카트로닉스공학과 석사과정

의 실증 단지에서 실증 시스템을 구성하여 고비용 장기간이 소요되는 해외 실증에 대응하고 있다. 특히, 대관령 실증단지는 국산 풍력발전기의 실증을 주도하고 있다[5]. 진동에 관해서 국내에서는 처음으로 750kW 급 풍력발전기의 진동 모니터링이 수행된 바 있으며[5], 1kW 및 6kW급 소형 풍력발전기에 대한 성능검사 및 실증[7]이 수행되었다. 본 연구에서는 벽지의 가구용 1kW 소형 발전기를 대상으로 진동 성능 검사 결과를 분석하여 작업 범위 내에서의 안전성에 문제가 없는지, 발전 효율에 진동이 미치는 악영향이 없는지를 평가한다. 연구 결과는 추후 유사 모델의 국산화 개발 시 진동에 안전한 구조를 설계하는데 활용될 것이다.

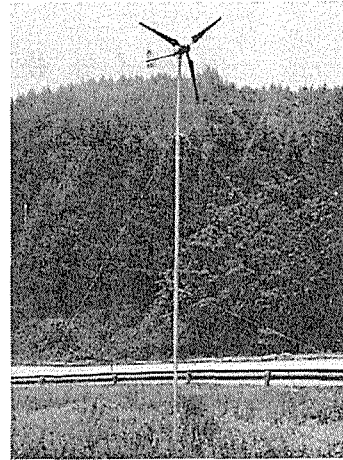


Fig. 1 1kW W/T test model

## 2. 풍력발전기 제원

Fig. 1은 오로라(주)에서 시제품으로 개발한 1kW 급 풍력발전기로 그 제원은 Table 1과 같다. 하단이 지면 앵커상에 편지지된 강관 타워는 상부 및 중간 지점에 각각 4개의 가이 케이블로 지지되고 상단에 4-날개 동기 발전기(synchronous generator)가 장착된다. 1인치 케이블의 장력을 조정하면서 쉽게 설치할 수 있다.

Table 1 Specification of 1kW W/T

	Specification
model	AU-1000(오로라)
rated power	1kW
hub height	7.5 m
rotor diameter	2.1 m
number of blades	3
operation speed	0-900 rpm
rated wind speed	10.5 m/s
cut-in wind speed	3 m/s
cut-out wind speed	16 m/s
yawing control	wind vane
weights	rotor blades : 2.04kg machine nacelle : 18.6kg tower : 47.5kg wire : 0.165kg/m

## 3. 진동 모니터링

### 3.1 모니터링 시스템의 구성

발전기의 진동 성능을 검사하기 위해서는 진동 신호뿐만 아니라 풍속, 풍향, 압력, 온도 및 회전 속도를 함께 모니터링 하는 것이 필요하다. 진동 검사 장치는 진동센서 및 풍향 센서를 대관령 풍력 실증단지의 원격 모니터링 시스템[8]에 연결하여 구성되었다. Fig. 2는 모니터링 시스템의 구성도이다. 모니터링 시스템의 기본 제어장치로 NI(national instruments)사의 산업용 PC인 NI-8176이 사용되었다. 풍속계 출력 신호들은 PXI6040E 보드를 통하여 5kHz로, 나머지 신호들은 1 Hz로 샘플링 되어 PC(NI-8176)로 입력된다. 전술한 풍향계, 압력계, 온도계, 가속도계 출력은 32채널 아날로그 입력보드인 SCXI 1102B를 통하여 내장형 제어기인 PC로 입력된다. 대관령 실증단지에서 취득한 실시간 데이터는 LabVIEW를 사용하여 강원대의 실험실에서 모니터링 된다. 이후 MATLAB을 이용하여 주파수분석과 상태 진단에 사용된다. 모니터링 및 분석과정을 Fig. 3에 도시하였다.

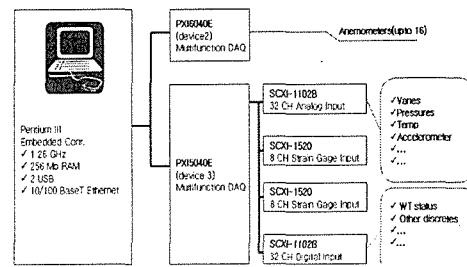


Fig. 2 Block diagram of the acceleration and wind condition measurement

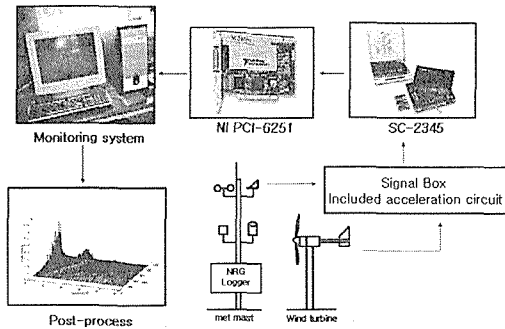


Fig. 3 Block diagram of monitoring and post processing



Fig. 4 Acceleration measurement set up

### 3.2 진동 모니터링 방법

작업 상태에서의 가속도 측정을 위해서 Fig. 4에서와 같이 일체식 IC칩 가속도계 ADXL105(Analog Devices)를 타워 상 7.2m 높이에 설치하였다. 타워의 횡진동 크기를 구하기 위해서 수평면상에서 수직하는 두 방향의 진동을 측정하였다. 시제품은 타워 하단부에서 핀 조인트의 경계 조건을 가지므로 핀 축 주위로 자유롭게 회전하는 운동 성분은 전적으로 가이 케이블의 장력으로 지지된다. 따라서, 가이 케이블의 장력이 타워 횡진동의 고유진동수를 결정하게 되며, 정격 속도와 관련하여 그 장력의 조정은 매우 중요한 현안이 된다. 이러한 상황을 고려하여 가속도 측정 축을 Fig. 5의 X,Y 두 방향으로 잡았다. Fig. 5에서 X축 방향의 운동 성분은 핀 축 주위로 타워가 회전함으로써 발생하는 운동 방향과 일치한다. 반면 Y축 성분은 하단이 고정지지 경계에 가까우므로 장력에 타워 강성이 더해져서 영향을 주게 된다. 20Hz의 샘플링 주파수로 가속도 신호를 취득하였고, 매 100초 구간의 신호에 대하여 Matlab을 사용하여 푸리에 변환을 수행하였다. 풍속과 풍향은 1Hz로 샘플링 하여 매 100초 구간의 평균치를 취하였다. 풍속계(NRG 40)는 바람의 세기에 비례하는 주파수를 출력시키고, 이는 LabVIEW 내에서 풍속으로 변환된다. 풍속은 타워 북동 5m에 풍향 계측타워 (meteorological mast)를 설치하고 7.5m 높이에서 측정하였다. 타워 상단부의 동기발전기는 로터 1회전 당 5개의 펄스 전력신호를 출력한다. 이 펄스 신호를 매초 측정 후, LabVIEW내에서 회전속도를 결정한다. 회전속도 또한, 1Hz로 샘플링 하여 매 100초 구간의 평균치를 취하였다.

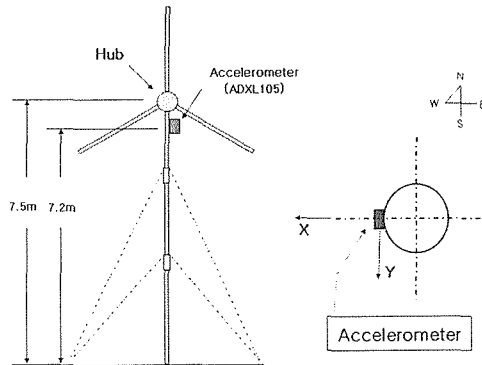
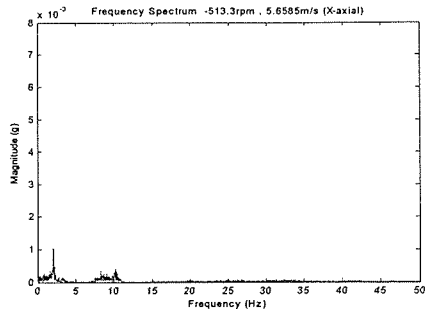


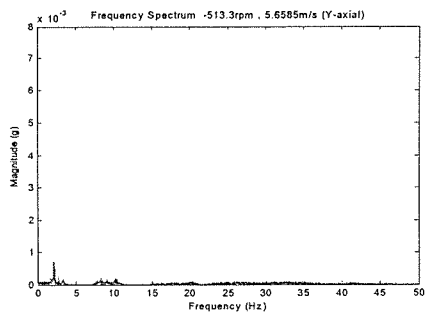
Fig. 5 Vibration measurement position

## 4. 모니터링 결과

Fig. 6 ~ Fig. 9는 풍속에 따라 측정된 X, Y 축 방향 가속도의 주파수 스펙트럼이다. X,Y 두 방향의 진동 모두가 두 부분의 피크 성분에 의하여 지배되는 것을 관찰할 수 있다. 두 부분의 피크 주파수 성분은 Table 2에서와 같이 X,Y 축 방향 모두에서 거의 차이를 보이지 않는다. 특이한 점으로 첫 번째 피크인 2.1Hz 성분은 풍속이나 그에 따른 회전속도에 무관하게 일정하다. 이는 타워의 횡진동 모드가 동적인 풍하중에 의하여 가진되어 발생하는 것을 의미한다. X,Y 방향 피크 성분이 거의 차이를 보이지 않는 것으로 보아 하단 지지 조건의 차이가 타워 강성에 별 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 두 번째 피크의 주파수는 풍속에 따라 증가한다. 풍속의 증가는 회전수의 증가를 가져오므로 두 번째 피크 주파수는 회전수 증가에 따라 증가하는 것으로 볼 수 있다. 이는 두 번째 피크군이 회전 불평형력에 기인하는 것을 의미한다[9].

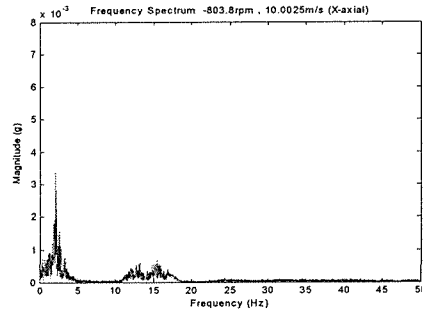


(a) X-component

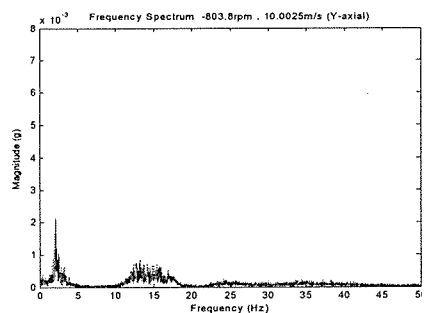


(b) Y-component

Fig. 6 Vibration spectrums at 5.66m/s

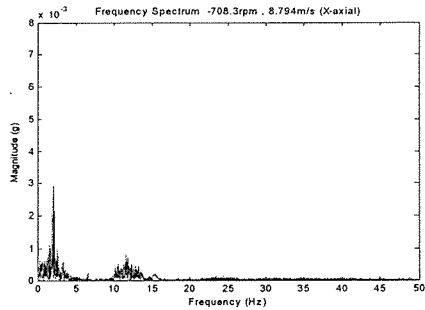


(a) X-component

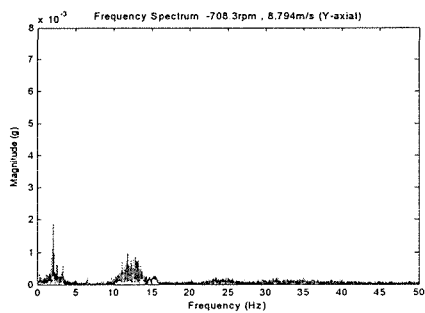


(b) Y-component

Fig. 8 Vibration spectrums at 10.0m/s

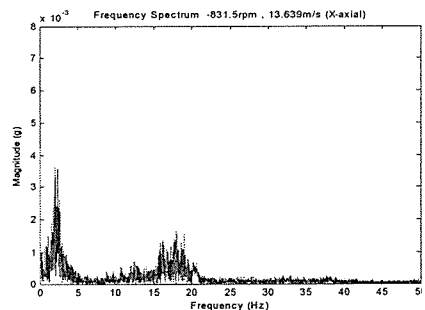


(a) X-component

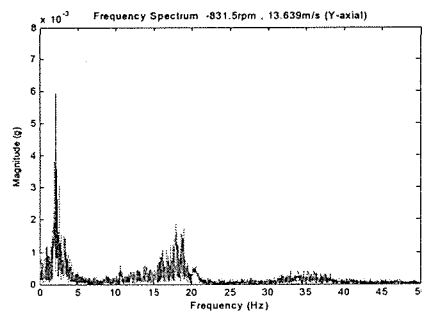


(b) Y-component

Fig. 7 Vibration spectrums at 8.79m/s



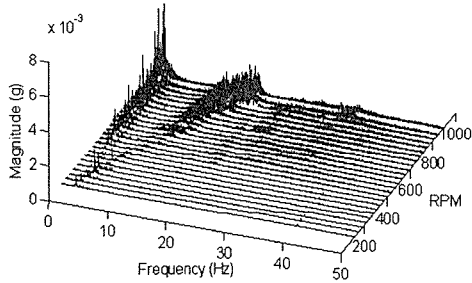
(a) X-component



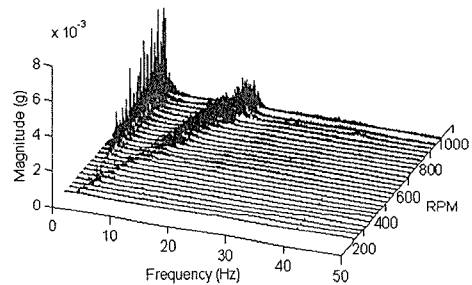
(b) Y-component

Fig. 9 Vibration spectrums at 13.64m/s

이러한 특성은 Fig.10의 3차원 스펙트럼 분석을 이용하면 확연히 관찰된다. 회전속도별로 취득한 X,Y 축 방향 가속도 신호를 주파수 분석하여 회전 속도에 따라 그린 결과이다. 회전수에 무관한 1차 피크군과 회전속도에 비례해서 증가하는 2차 피크군을 관찰할 수 있다. 2차 피크군은 날개 및 발전기의 회전 불평형력에 의하여 가진되는 성분임을 의미한다. 회전수(rpm)의 1차 조화성분에 해당하는 주파수에서 피크가 발생하는 것이 이를 입증한다. 이전의 6kW 시제품의[7] 특성에서 회전수 성분이 거의 발생하지 않았던 점과 비교할 때, 본 시제품은 회전부의 중량이 작음에도 불구하고 평형잡이(balancing)가 좋지 않은 상태로 평가된다. 공진대역을 검토해보면, 고유진동수 2.1Hz는 회전속도 126rpm에서 공진된다. 그러나 126rpm은 최대 작업 속도 900rpm을 감안할 때 매우 낮은 속도 영역이고, 풍속 또한 매우 낮은 범위이다. Fig. 11은 풍속과 회전 속도 사이의 관계를 모니터링 한 결과이다. 공진 속도 126rpm으로의 발전은 2m/s 정도의 풍속 하에서 이루어진다. 2m/s 정도의 풍속은 Fig.11에서 본 시제품의 작업 풍속 범위의 하단에 위치하므로, 발전에 큰 의미가 없는 범위이다. 결과적으로 고유진동수 2.1Hz에 상응하는 공진대역은 발전 효율 측면에서 별 문제가 되지 않는 범위에 위치한다.



(a) waterfall (x-axial)



(b) waterfall (y-axial)

Fig. 10 Water fall plot of W/T vibration

공진 상태에서의 구조 안전성을 검토하기 위하여 풍속과 진동레벨 사이의 관계를 Fig.12와 같이 구하였다. 풍속에 따른 가속도의 차승평균제곱근을 보면, 공진 대역인 2m/s 부근에서 X,Y 두 성분 모두 공진으로 인한 레벨의 증가를 보인다. 그러나 매우 낮은 풍속 하에서의 공진이므로, 보다 높은 풍속에서의 정상적인 진동 레벨에 비해서도 그리 높은 수준은 아니다. 결론적으로 작업범위 하단에서 공진이 발생하나 구조 안전성 차원에서 문제가 되지는 않는다.

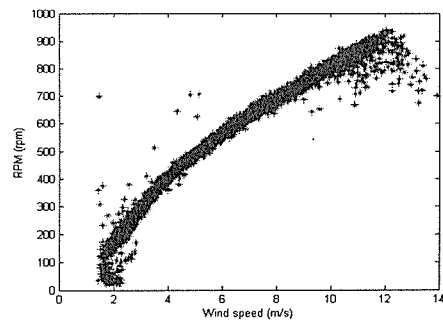
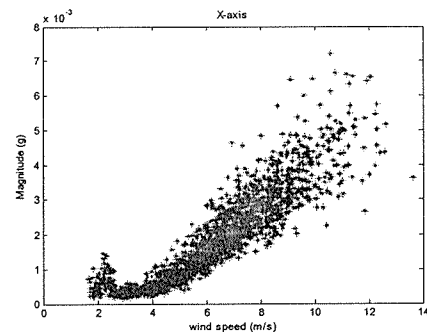
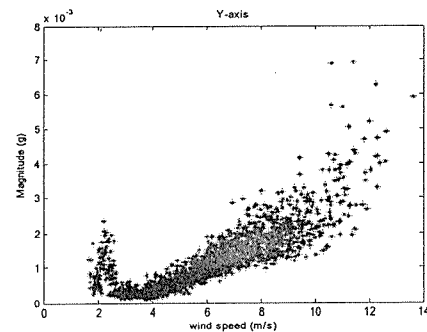


Fig. 11 Wind speed and rotor speed



(a) X-component



(b) Y-component

Fig. 12 Vibration magnitude(rms) vs. wind speed

### 5. 결론 및 토론

대관령 풍력실증연구단지 1kW급 소형풍력발전기(AU-1000, 오로라(주))의 진동 성능을 모니터링한 결과 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 타워의 진동은 로타의 회전 속도에 무관한 2.1Hz의 피크 주파수 성분과, 회전 속도의 1차 조화 성분의 두 가지 피크 군에 의하여 지배된다.
- 2) 2.1Hz의 피크 성분은 타워의 1차 횡진동 모드가 동적 풍하중에 의하여 공진되는 것으로 밝혀졌다.
- 3) 2차 피크군의 주파수는 회전수에 비례하여 증가하므로 회전 불평형력에 기인한다. 기존의 소형 풍력발전기에 비해서 이 2차 피크 성분이 크게 나오는 것은 회전체의 평형잡이(balancing) 상태가 좋지 않음을 의미한다.
- 4) 2.1Hz의 공진은 126rpm대역에서 발생하는데, 작업 풍속 범위의 하단에 위치하는 관계로 발전 효율에 크게 영향을 미치지 않는다. 또한 공진 레벨도 정상적인 작업 속도에서의 진동 레벨에 비해 크지 않으므로 심각한 공진에 의한 안정성 문제는 없는 것으로 평가된다.

### 후 기

본 연구는 (주)오로라의 지원으로 수행된 '1kW 소형 풍력발전기 성능검사'의 일환이며, 관계자에게 감사한다.

### 참고문헌

- [1] European Wind Energy Association and Green Peace, "Wind Force 12".
- [2] <http://www.unison.co.kr>
- [3] T.Burton, "Wind Energy Hand Book", John Wiley and Sons, Ltd, 2002.
- [4] E.Hau, "Wind Turbines", Springer Verlag, 2000.
- [5] S.H.Kim, and etl. "Wind power technology development, transfer, and commercialization with construction of a wind turbine test site in Korea", *International Journal of Technology Transfer and Commercialization*, Vol.4(3), pp. 360~385, 2005.
- [6] 김석현, 남윤수, 은성용, "750kW 풍력발전기

- 타워 구조의 진동 특성", *한국소음진동공학회 논문집*, 제 15권 2호, pp. 219~224, 2005.
- [7] 김석현 외6인, "6kW 독립형 풍력발전기의 진동 모니터링 및 분석", *산업기술연구소*, 제 25권 A호, pp. 81~86, 2005.
- [8] 남윤수, 김형기, 유능수, 이정완, "LabVIEW를 이용한 풍력발전기 모니터링 시스템 개발", *한국정밀공학회 논문집*, 제 20권 5호, pp. 92~97, 2003.
- [9] R.A.Collacott, "Vibration Monitoring and Diagnosis", *John Wiley and Sons, Ltd*, 1979.